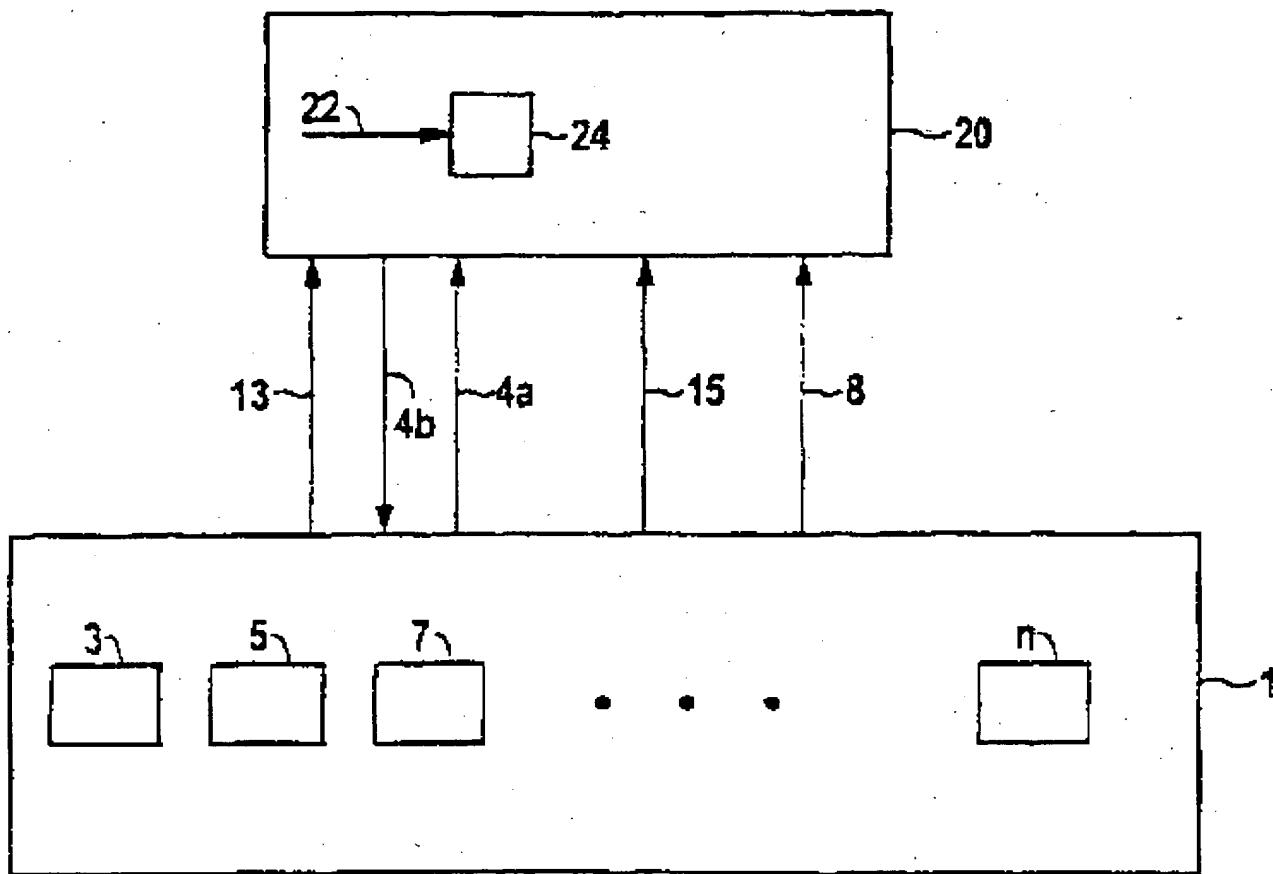


AN: PAT 2001-541973  
TI: Operating method for technical system enabling intelligent operating parameter setting for technical system with several system parts for optimal system operation involves describing operating parameter dependency on adjustable system parameter, optimising parameters whilst maintaining secondary conditions  
PN: WO200167274-A2  
PD: 13.09.2001  
AB: The method involves selecting at least one parameter (13), for optimisation; producing a mathematical and/or empirical description of the dependency of the operating parameter on the adjustable system parameter (4b) and unavoidable system boundary parameters arising in operation; detecting the current parameter values (4a); determining secondary conditions (8) for the adjustable parameter; optimising the system parameters whilst maintaining the secondary conditions for the current operating state and setting up the system parts (3,5,7,...n) using the optimised system parameters..; USE - For operating technical system, e.g. turbine generator system for generating electrical energy. ADVANTAGE - Enables intelligent setting of one or more operating parameters of technical system with several system parts for optimal system operation.  
PA: (SIEI ) SIEMENS AG;  
(VOIJ ) VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION INC;  
IN: DREHER T; SOELLNER S;  
FA: WO200167274-A2 13.09.2001; DE20117191-U1 04.04.2002;  
**DE10011607-A1** 20.09.2001; AU200160096-A 17.09.2001;  
CO: AE; AG; AL; AM; AT; AU; AZ; BA; BB; BE; BG; BR; BY; BZ; CA;  
CH; CN; CO; CR; CU; CY; CZ; DE; DK; DM; DZ; EA; EE; ES; FI; FR;  
GB; GD; GE; GH; GM; GR; HR; HU; ID; IE; IL; IN; IS; IT; JP; KE;  
KG; KP; KR; KZ; LC; LK; LR; LS; LT; LU; LV; MA; MC; MD; MG; MK;  
MN; MW; MX; MZ; NL; NO; NZ; OA; PL; PT; RO; RU; SD; SE; SG; SI;  
SK; SL; SZ; TJ; TM; TR; TT; TZ; UA; UG; US; UZ; VN; WO; YU; ZA;  
ZW;  
DN: AE; AG; AL; AM; AT; AU; AZ; BA; BB; BG; BR; BY; BZ; ČA; CH;  
CN; CO; CR; CU; CZ; DE; DK; DM; DZ; EE; ES; FI; GB; GD; GE; GH;  
GM; HR; HU; ID; IL; IN; IS; JP; KE; KG; KP; KR; KZ; LC; LK; LR;  
LS; LT; LU; LV; MA; MD; MG; MK; MN; MW; MX; MZ; NO; NZ; PL; PT;  
RO; RU; SD; SE; SG; SI; SK; SL; TJ; TM; TR; TT; TZ; UA; UG; US;  
UZ; VN; YU; ZA; ZW;  
DR: AT; BE; CH; CY; DE; DK; EA; ES; FI; FR; GB; GH; GM; GR; IE;  
IT; KE; LS; LU; MC; MW; MZ; NL; OA; PT; SD; SE; SL; SZ; TR; TZ;  
UG; ZW;  
IC: G05B-017/02; G05B-019/042; G06F-017/00;  
MC: T01-J; T01-J04D; T01-J07B; T06-A05; T06-A08; X11-A09;  
DC: T01; T06; X11;  
FN: 2001541973.gif  
PR: DE1011607 10.03.2000;  
FP: 13.09.2001  
UP: 15.05.2002

THIS PAGE BLANK (USPTO)



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

# Offenlegungsschrift

⑯ DE 100 11 607 A 1

⑮ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 05 B 17/02**  
G 05 B 19/042  
// G06F 19/00

⑯ Aktenzeichen: 100 11 607.8  
⑯ Anmeldetag: 10. 3. 2000  
⑯ Offenlegungstag: 20. 9. 2001

DE 100 11 607 A 1

⑯ Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

⑯ Vertreter:  
Dr. Weitzel & Partner, 89522 Heidenheim

⑯ Erfinder:  
Dreher, Torsten, Dipl.-Ing. (Univ.), 91056 Erlangen,  
DE; Söllner, Siegfried, Dipl.-Ing. (Univ.), 91054  
Erlangen, DE

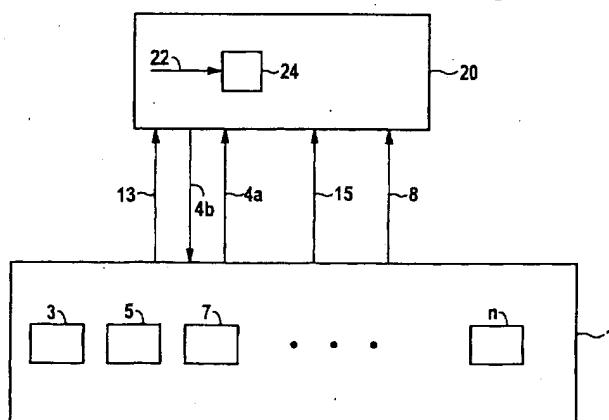
⑯ Entgegenhaltungen:  
DE 689 02 586 T2  
WO 99 66 434 A2  
Schuler, Hans: Prozeßführung, 1999, ISBN 3-486-  
23477-3, S. 293-307;  
Sprave, Joachim: Evolutionäre Algorithmen zur  
Parameteroptimierung. In: at-Automatisierungs-  
technik, 1995, 3, S. 110-117;

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Verfahren und Vorrichtung sowie Computerprogrammprodukt zum Betrieb einer technischen Anlage

⑯ Die Erfindung betrifft ein Verfahren, eine Vorrichtung sowie ein Computerprogrammprodukt zum optimierten Betrieb einer Anlagenteile mit mehreren einstellbaren Anlagenparametern enthaltenden technischen Anlage, wobei der Betrieb der Anlage von mehreren durch Anlagenparameter beeinflussbaren Betriebsgrößen abhängig ist. Mittels einer Beschreibung (22) der Abhängigkeit der zu optimierenden Betriebsgröße (13) von den einstellbaren Anlagenparametern (4b) werden optimale Werte für die einstellbaren Anlagenparameter (4b) ermittelt, wobei Nebenbedingungen (8) eingehalten werden.



DE 100 11 607 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum optimierten Betrieb einer Anlagenteile mit mehreren einstellbaren Anlagenparametern enthaltenden technischen Anlage, wobei der Betrieb der Anlage von mehreren durch Anlagenparameter beeinflussbaren Betriebsgrößen abhängig ist. Die Erfindung betrifft ferner eine Vorrichtung sowie ein Computerprogrammprodukt zur Durchführung des Verfahrens.

An den Betrieb einer technischen Anlage können vielfältige Anforderungen gestellt werden. So soll z. B. eine Produktionsanlage möglichst kostengünstig produzieren oder eine Anlage zur Erzeugung von elektrischer Energie soll eine festgelegte elektrische Gesamtleitung zur Verfügung stellen, wobei die vorhandenen Ressourcen bestmöglich genutzt werden sollen. In modernen technischen Anlagen werden Automatisierungssysteme eingesetzt, welche die Arbeit des Bedienpersonals vereinfachen und effizienter gestalten sollen. Die Automatisierungssysteme überwachen dabei die Prozessdaten der Anlagenteile und sorgen für automatische Eingriffe in deren Betrieb. Sie leiten z. B. eine Abschaltung der technischen Anlage oder von Anlagenteilen ein, wenn schwerwiegende Sicherheitsprobleme oder Überlastungssituationen vorliegen.

Die Schnittstelle zwischen Bedienpersonal und technischer Anlage stellt das sogenannte Bedien- und Beobachtungssystem dar. Dabei werden dem Bedienpersonal beispielsweise auf Bildschirmen die Zustände der technischen Anlage und ihrer Anlagenteile angezeigt. Das Bedienpersonal kann über Eingabegeräte von Computern wie z. B. Maus und Tastatur die Zustände der technischen Anlage und ihrer Anlagenteile durch Eingabe von Sollwerten und Befehlen verändern. Diese Befehle und Sollwertvorgaben werden dann bei den entsprechenden Anlagenteilen durch die dort vorhandenen Automatisierungssysteme in direkte Eingriffe in die technische Anlage umgesetzt.

Viele Anlagenteile der technischen Anlage sind gewöhnlich zur Erfüllung ihrer Aufgaben mittels Anlagenparametern einstellbar. Der aktuelle Betriebspunkt jedes Anlagenteils ergibt sich aus den aktuellen Werten der jeweils zugehörigen Anlagenparameter. Der Betriebszustand der technischen Anlage ergibt sich aus den Betriebspunkten der Anlagenteile; so tragen im Allgemeinen mehrere oder sogar alle Anlagenteile der technischen Anlage zum Betriebszustand der technischen Anlage bei.

Beispielsweise befinden sich in einer technischen Anlage zur Erzeugung von elektrischer Energie mehrere Turbine-Generator-Einheiten, von denen jede an einem bestimmten Betriebspunkt arbeitet. An ihrem jeweiligen Betriebspunkt weist jede Turbine-Generator-Einheit im Allgemeinen eine Vielzahl von Betriebsgrößen, wie z. B. den Wirkungsgrad auf, der vom jeweiligen Betriebspunkt abhängt.

Betrachtet man nun den Gesamtwirkungsgrad der technischen Anlage, so ist dieser abhängig von den Wirkungsgraden jeder Teilanlage bei den jeweiligen Betriebspunkten. Eine Änderung eines Betriebspunktes eines Anlagenteils mittels der jeweils zugehörigen Anlagenparameter führt somit zu einer Veränderung der Betriebsgröße der technischen Anlage.

Oft werden an das Bedienpersonal einer technischen Anlage Aufgaben herangetragen, eine Betriebsgröße der technischen Anlage auf einen bestimmten Wert einzustellen. Da sich die Betriebsgröße der technischen Anlage nicht unmittelbar einstellen lässt, geschieht die Lösung der Aufgabe durch Einstellung der Anlagenteile mittels der zugehörigen Anlagenparameter. Im Allgemeinen gibt es mehrere Kombinationen von Anlagenparametern, die die gestellte Aufgabe erfüllen, diese sind jedoch im Hinblick auf weitere Kriterien

im Allgemeinen nicht gleichwertig. Derartige Kriterien können z. B. minimale Erzeugungskosten oder ein maximaler Wirkungsgrad der technischen Anlage sein. Das Bedienpersonal der technischen Anlage hat nun die Aufgabe, eine ge-

forderte Betriebsgröße der technischen Anlage mittels der Anlagenparameter einzustellen, wobei zusätzliche Kriterien beispielsweise der oben angegebenen Art zu beachten sind. Das Bedienpersonal löst diese Aufgaben häufig dadurch, dass es die Anlagenteile mittels Erfahrungswerten einstellt, die es aufgrund seiner Berufspraxis in vergleichbaren Betriebssituationen der technischen Anlage erlangt hat. Ob die so realisierte Lösung der Aufgabe durch das Bedienpersonal eine gute oder sogar die bestmögliche Lösung der Aufgabe im Hinblick auf die beispielhaft oben angegebenen weiteren Kriterien darstellt, bleibt offen.

In DE 197 48 315 A1 wird ein Verfahren zur Optimierung des Betriebs von fossil befeuerten Kraftwerksanlagen angegeben. Dabei wird der wirtschaftliche Nutzen von Maßnahmen zur Verbesserung des Anlagenwirkungsgrades und darüber hinaus der dafür erforderliche wirtschaftliche Aufwand festgestellt. In Abhängigkeit des Vergleichs des wirtschaftlichen Nutzens und des wirtschaftlichen Aufwandes von bzw. für Verbesserungsmaßnahmen wird entschieden, ob, wann und/oder welche Verbesserungsmaßnahmen vorgenommen werden.

Durch die beschriebene Verfahrensweise ist es möglich, dass Kraftwerksanlagen wirtschaftlich optimal betrieben werden können, indem aus dem Vergleich der wesentlichen wirtschaftlichen Auswirkungen der Verbesserungsmaßnahmen und dem dabei zu erwartenden wirtschaftlichen Nutzen einerseits und dem für die Durchführung der Maßnahmen erforderlichen Aufwand andererseits Schlussfolgerungen für den Betrieb der Kraftwerksanlage gezogen werden.

In der oben genannten Schrift ist zwar die Notwendigkeit genannt, Betriebsgrößen der technischen Anlage wie z. B. den Wirkungsgrad durch geeignete Maßnahmen zu optimieren, jedoch finden sich keine Hinweise, mit welchen konkreten Maßnahmen dies geschehen könnte. Es wird lediglich davon ausgegangen, dass derartige Methoden zur Optimierung einer Betriebsgröße der technischen Anlage bekannt sind. Der Vergleich zwischen dem für die Durchführung der Optimierung benötigten Aufwand und dem letztendlich daraus resultierenden wirtschaftlichen Nutzen stellt den Kerngedanken der oben genannten Schrift dar. Um aus dem in der Schrift offenbarten Verfahren größtmöglichen Nutzen zu ziehen ist es notwendig, möglichst effektive Verfahren für die Optimierung einer Betriebsgröße wie z. B. des Wirkungsgrades einer technischen Anlage anzugeben, die dann für den vorher genannten Vergleich herangezogen werden können.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine oder mehrere Betriebsgrößen einer technischen Anlage mit mehreren Anlagenteilen intelligent einstellbar zu machen und mittels der Anlagenparameter der Anlagenteile optimal einzustellen, wobei Nebenbedingungen nicht verletzt werden dürfen.

Erfundungsgemäß besteht das Verfahren der eingangs genannten Art aus folgenden Schritten:

1. Mindestens eine der Betriebsgrößen der technischen Anlage wird für die Optimierung ausgewählt.
2. Eine mathematische und/oder messtechnisch gestützte Beschreibung der Abhängigkeit der zu optimierenden Betriebsgröße der technischen Anlage von den einstellbaren Anlagenparametern und sich zwangsläufig aus dem Betrieb ergebenden Randparametern wird erstellt.
3. Die aktuellen Anlagenparameter und die aktuellen

Randparameter werden erfasst.

4. Nebenbedingungen für die einstellbaren Anlagenparameter werden festgelegt.
5. Für den aktuellen, durch die aktuellen Anlagenparameter und Randparameter erfassten Betriebszustand werden unter Einhaltung der Nebenbedingungen die Anlagenparameter optimiert.
6. Die Anlagenteile werden mittels der optimierten Anlagenparameter eingestellt.

Unter "mathematisch und/oder messtechnisch gestützte Beschreibung" werden in diesem Zusammenhang insbesondere analytische mathematische Formeln bzw. aus diskreten, an Stützstellen gewonnenen Datenpunkten bestehende Kennlinienfelder verstanden.

Das Verfahren der erfundungsgemäßen Art erfordert keine Veränderung der Hardware der Komponenten der Anlagenteile; derartige Veränderungen können unter Umständen darüber hinaus zu einer verbesserten Betriebsweise beitragen, werden aber vorteilhaft bereits bei der Auslegung der Anlage und nicht mehr bei laufendem Betrieb vorgenommen, was sehr kostspielig wäre. Beim erfundungsgemäßen Verfahren werden die Anlagenteile der technischen Anlage intelligent so eingestellt, dass sich ein optimierter Betrieb ergibt und Nebenbedingungen nicht verletzt werden.

Derartige Nebenbedingungen können z. B. sein: von einer Anlage zur Erzeugung von elektrischer Energie wird gefordert, dass sie eine festgelegte Gesamtleistung – die sich zusammensetzt aus der Summe der Einzelleistungen der Anlagenteile – zur Verfügung zu stellen hat und jeder Anlagenteil nur in einem jeweils zulässigen Betriebsbereich betrieben werden darf. Es sind dann beispielsweise die Produktionskosten der technischen Anlage oder der Wirkungsgrad zu optimieren, wobei die vorher genannten Nebenbedingungen eingehalten werden müssen. Die genannten Betriebsgrößen Produktionskosten und Wirkungsgrad der technischen Anlage sind lediglich beispielhaft zu verstehen – das erfundungsgemäße Verfahren eignet sich darüber hinaus zur Optimierung einer Vielzahl von weiteren Betriebsgrößen einer technischen Anlage.

Die Möglichkeit, eine oder mehrere Betriebsgrößen einer technischen Anlage mittels des erfundungsgemäßen Verfahrens optimal einstellbar zu machen, befreit das Bedienpersonal der technischen Anlage von der Aufgabe, Überlegungen – meist unter Zeitdruck – anstellen zu müssen, wie die Anlagenparameter der Anlagenteile einzustellen sind, so dass sich ein geforderter Betriebszustand der technischen Anlagen einstellt und dieser Betriebszustand im Sinne der für die Optimierung ausgewählten Betriebsgröße optimal ist. Im Allgemeinen kann menschliches Bedienpersonal durch manuelles Einstellen der Anlagenparameter zwar einen geforderten Betriebszustand meist erreichen, aber da es zur Erreichung dieses geforderten Betriebszustand meist eine Vielzahl möglicher Kombinationen der Anlagenparameter gibt, wird selten oder nur in bereits bekannten Betriebssituationen oder Spezialfällen ein optimaler Betriebszustand der technischen Anlage erreicht. Das erfundungsgemäße Verfahren beseitigt diesen Mangel, in dem es optimierte Anlagenparameter bereitstellt, die zum einen einen geforderten Betriebszustand – ausgedrückt durch die Nebenbedingungen – der technischen Anlage erreichen und zum anderen gleichzeitig dafür sorgen, das eine oder mehrere ausgewählte Betriebsgrößen der technischen Anlage optimiert werden.

In vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung wird die Abhängigkeit der zu optimierenden Betriebsgröße der technischen Anlage von den einstellbaren Anlagenparametern und Randparametern durch tabellenartig dargestellte diskrete Werte beschrieben. Meist stehen bei einer technischen An-

lage für die Anlagenteile sogenannte Kennlinienfelder zur Verfügung, die jeweils das Verhalten einer Betriebsgröße eines Anlagenteils in Abhängigkeit von einem Anlagenparameter beschreiben. Um eine derartige Beschreibung zu erhalten, werden meist Messungen am realen Anlagenteil oder an dessen Labormodell durchgeführt, wobei dem aktuell eingestellten Wert eines Anlagenparameters der dadurch verursachte aktuelle Wert der Betriebsgröße des Anlagenteils zugeordnet wird; mehrere derartige Messpunkte beschreiben als diskrete Kurve das Betriebsverhalten eines Anlagenteils bei einem festen Wert eines Randparameters. Für weitere feste Werte des Randparameters werden in entsprechender Weise Messpunkte aufgenommen. Die so ermittelten Kurven werden als Kennlinienfeld des Anlagenteils bezeichnet. In entsprechender Weise werden die Kennlinienfelder der weiteren Anlagenteile ermittelt. Der Vorteil der Beschreibung des Betriebsverhaltens eines Anlagenteils durch diskrete beispielsweise messtechnisch gewonnene Messpunkte besteht darin, dass keine analytische mathematische Beschreibung z. B. in Form einer Formel ermittelt werden muss, sondern dass das Betriebsverhalten des Anlagenteils bei verschiedenen Betriebspunkten gemessen wird. So ist auch das Betriebsverhalten von solchen Anlagenteilen erfassbar, für die keine analytische mathematische Beschreibung angegeben werden kann.

In weiterer vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung werden durch Interpolation ein aktueller Wert der mindestens einen Betriebsgröße aus den einen aktuellen Betriebszustand beschreibenden diskreten Werten berechnet, dieser aktuelle Wert der mindestens einen Betriebsgröße optimiert und daraus die optimierten Anlagenparameter ermittelt.

Die Erfindung führt daher zu einer Vorrichtung zum optimierten Betrieb einer Anlagenteile mit mehreren einstellbaren Anlagenparametern enthaltenden technischen Anlage. In dieser Vorrichtung ist das erfundungsgemäße Verfahren in einer Recheneinheit implementiert, die mit der technischen Anlage Daten austauscht. Die technische Anlage überträgt an die Recheneinheit die Werte der Randparameter, die Werte der aktuellen Anlagenparameter und die Nebenbedingungen, die bei der Optimierung beachtet werden müssen. Die Optimierungsergebnisse werden von der Recheneinheit an die technische Anlage als optimierte Anlagenparameter übergeben, mittels derer die Anlagenteile einzustellen sind. Das erfundungsgemäße Verfahren muss nicht zwangsläufig in einer separaten Recheneinheit implementiert sein, es kann auch in z. B. einem bereits bestehenden Automatisierungssystem der technischen Anlage implementiert werden, wenn zwischen diesem und den weiteren Automatisierungssystemen der technischen Anlage eine Datenverbindung besteht und so Zugriff auf die Anlagenparameter und Betriebsgrößen der weiteren Anlagenteile besteht.

Des Weiteren führt die Erfindung zu einem Computerprogrammprodukt, das direkt in den internen Speicher eines digitalen Computers geladen werden kann und Softwarecodeabschnitte umfasst, mit denen die Schritte des erfundungsgemäßen Verfahrens ausgeführt werden, wenn das Produkt auf einem Computer läuft.

Drei Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand der beigefügten Zeichnungen erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 eine technische Anlage verbunden mit einer Recheneinheit zur Durchführung des erfundungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 2 eine Recheneinheit zur Durchführung des erfundungsgemäßen Verfahrens mit einem Interpolator zur Interpolation aktueller Werte des Betriebszustands, und

Fig. 3 eine technische Anlage mit mehreren Anlagenteilen verbunden mit einer Recheneinheit zur Durchführung des erfundungsgemäßen Verfahrens mit mehreren Verarbei-

tungseinheiten zur Interpolation sowie zur Durchführung verschiedener mathematischer Operationen.

Fig. 1 zeigt eine technische Anlage 1 mit mehreren Anlagenteilen 3, 5, 7, ..., n, die insofern autark sind, als jeder Anlagenteil nur die Eingabe von Anlagenparametern benötigt, die dann (z. B. über einen eigenen Rechner) das Anlagenteil steuern.

Die Anlage ist mit einer Recheneinheit 20 zur Durchführung des erfundungsgemäßen Verfahrens verbunden ist. Die Recheneinheit 20 enthält eine Optimierungsstufe 24, die eine mathematische und/oder messtechnisch gestützte Beschreibung 22 der Abhängigkeit der zu optimierenden Betriebsgröße 13 der technischen Anlage 1 von den einstellbaren Anlagenparametern 4b und sich zwangsläufig aus dem Betrieb ergebenden Randparametern 15 z. B. aus einem Speicher oder aus einer Sensorik abruf, verarbeitet und die optimierten Anlagenparameter 4b an die technische Anlage übergibt, mittels derer die Anlagenteile einzustellen sind. Die Nebenbedingungen 8 (z. B. Gleichungen und/oder Ungleichungen), die bei der Optimierung beachtet werden müssen, sowie die aktuellen Werte 4a der Anlagenparameter werden von der technischen Anlage 1 an die Recheneinheit 20 übergeben. Die aktuellen Werte 4a der Anlagenparameter erlauben die Bestimmung des aktuellen Wertes der zu optimierenden Betriebsgröße 13 unter Zuhilfenahme der mathematisch und/oder messtechnisch gestützten Beschreibung 22.

Die in Fig. 2 gezeigte Ausführungsform der Recheneinheit 20 besitzt einen Interpolator INT, eine Verarbeitungsstufe VS und einen Optimierer OPT. Diskrete Werte 23, die die Abhängigkeit der zu optimierenden Betriebsgröße der technischen Anlage von den einstellbaren Anlagenparametern und Randparametern als Kennlinienfeld beschreiben, werden vom Interpolator INT unter Verwendung von Randparametern 15 verarbeitet; es stehen dann interpolierte Werte der Betriebsgröße der technischen Anlage für die aktuell vorliegenden Randparameter 15 zur Verfügung. Bei dieser genannten Interpolation wird aus dem vorzugsweise messtechnisch gewonnenen Kennlinienfeld der technischen Anlage diejenige Kennlinie interpoliert, die mit dem aktuellen Randparameter 15 korrespondiert. In der nachfolgenden Verarbeitungsstufe VS wird aus der interpolierten Kennlinie unter Verwendung der aktuellen Anlagenparameter 4a der aktuelle Wert 13 eines zu optimierenden Betriebsparameters der technischen Anlage ermittelt. Durch den Optimierer OPT wird dieser aktuelle Wert 13 optimiert, wobei Nebenbedingungen 8 beachtet werden. Zur Erreichung des optimalen Wertes der zu optimierenden Betriebsgröße der technischen Anlage ermittelt der Optimierer OPT optimierte Anlagenparameter 4b; mittels dieser optimierten Anlagenparameter 4b sind dann die Anlagenteile einzustellen.

In Fig. 3 ist eine technische Anlage 1 mit mehreren Anlagenteilen 3, 5, 7, ..., n und einer anderen Ausführungsform 20' der Recheneinheit aus Fig. 1 dargestellt. Die Recheneinheit 20' enthält eine Eingabeeinheit EE, beispielsweise eine Tastatur, mit deren Hilfe die vorzugsweise messtechnisch an festen Stützstellen ermittelten diskreten Werte 23 zur technischen Beschreibung des Verhaltens der zu optimierenden Betriebsgröße der technischen Anlage als sogenanntes Kennlinienfeld erfasst werden. Ein erster Interpolator INT1 ermittelt aus den diskreten Werten 23 des Kennlinienfeldes eine vorzugsweise abschnittsweise analytische mathematische Darstellung jeder durch diskrete Werte beschriebenen Kennlinie des Kennlinienfeldes. Ein Abschnitt ist durch eine erste Stützstelle und eine unmittelbar darauf folgende zweite Stützstelle begrenzt.

Gebräuchliche bekannte Methoden zur Interpolation sind die lineare Interpolation, die Interpolation durch Polynome

oder rationale Funktionen und die Interpolation mittels so genannter Splines. Für den Interpolator INT1 wird vorzugsweise die Interpolation mittels Splines verwendet. Dabei wird die Interpolation zwischen den an Stützstellen gewonnenen diskreten Werten 23 abschnittsweise durch Polynome niedrigen Grades vorgenommen. Jedem Abschnitt wird dabei ein Polynom zugeordnet. Eine sogenannte Spline-Funktion besteht aus den den Abschnitten zugeordneten Polynomen; die Polynome haben alle den selben Grad. Besonders vorteilhaft verwendet man Polynome dritten Grades und erhält damit eine sogenannte kubische Spline-Funktion. Kubische Spline-Funktionen besitzen eine im mathematischen Sinn glatte erste Ableitung und daraus bedingt eine kontinuierliche zweite Ableitung. Beide Ableitungen liegen analytisch vor, da die Ableitung von Polynomen und insbesondere von Polynomen dritten Grades bekannt ist. Bei der Verwendung von Spline-Funktionen dritten Grades sind folglich zu jedem Abschnitt vier Spline-Koeffizienten zu ermitteln, die die Koeffizienten des zugehörigen Polynoms darstellen. Zur Ermittlung der Spline-Koeffizienten werden folgende Bedingungen gefordert:

1. Die Spline-Funktion muss an den Stützstellen die durch die technische Beschreibung vorgegebenen diskreten Werte annehmen und stetig sein.
2. Die erste Ableitung der Spline-Funktion muss in den Stützstellen stetig sein.
3. Die zweite Ableitung der Spline-Funktion muss ebenfalls in den Stützstellen stetig sein.

Vorzugsweise nimmt zusätzlich die zweite Ableitung an den äußeren Stützstellen, also an denjenigen Stützstellen, die nur zu einem Abschnitt gehören – den sogenannten äußeren Stützstellen – den Wert Null an. Algorithmen zur abschnittsweisen Bestimmung der Spline-Koeffizienten unter den vorher genannten Bedingungen sind bekannt. Zu jeder Kennlinie des Kennlinienfeldes – welches durch die diskreten Werte 23 beschrieben ist –, die zu jeweils einem festen Wert eines Randparameters gehört, ermittelt der erste Interpolator INT1 bei Verwendung von kubischen Spline-Funktionen zur Interpolation für jeden Abschnitt des durch die diskreten Werte 23 beschriebenen Kennlinienfeldes die Spline-Koeffizienten; für jeden dieser Abschnitte ermittelt der Interpolator INT1 bei der Verwendung von kubischen Spline-Funktionen folglich vier Koeffizienten. Der erste Interpolator INT1 interpoliert also über eine erste Größe – und zwar über die Anlagenparameter 4a –, indem er zu jeweils einer diskret beschriebenen Kennlinie des Kennlinienfeldes, welche zu einem festen Wert eines Randparameters gehört, für jeden Abschnitt analytisch Spline-Koeffizienten 32 ermittelt. Diese Koeffizienten 32 werden vorteilhaft den entsprechenden Abschnitten zugeordnet und in einem Speicher SP abgelegt. Die bisher genannten Schritte der Erfassung des Kennlinienfeldes und Interpolation über eine erste Größe müssen nur einmal offline durchgeführt werden; die Verarbeitung von vom aktuellen Betriebszustand der technischen Anlage 1 abhängigen Größen erfolgt in den nachfolgenden Verarbeitungseinheiten.

Ein zweiter Interpolator INT2 interpoliert über eine zweite Größe, und zwar über die Randparameter 15. Diese Interpolation ist notwendig, da sowohl die das Kennlinienfeld beschreibenden diskreten Werte 23 als auch die über die erste Interpolationsgröße abschnittsweise ermittelten Spline-Koeffizienten 32 jeweils einem festen Wert eines Randparameters zugeordnet sind. Liegt nun ein aktueller Betriebszustand, beschrieben durch Randparameter 15, der technischen Anlage vor, so sind im Allgemeinen für diesen speziellen Wert eines Randparameters 15 keine gemessenen

diskreten Werte 23 bzw. interpolierten Werte 32 eines Kennlinienfeldes der technischen Anlage 1 verfügbar. Der zweite Interpolator INT2 ermittelt zu den aktuellen Randparametern 15 eine zugehörige interpolierte Kennlinie eines Kennlinienfeldes der technischen Anlage 1. Vorteilhaft verwendet der Interpolator INT2 dabei diejenigen beiden durch den Interpolator INT1 für feste Werte eines Randparameters interpolierte Kennlinien, die im Vergleich zum aktuellen Wert 15 eines Randparameters der technischen Anlage zu einem ersten festen nächstgrößeren bzw. zu einem zweiten festen nächstkleineren Wert des jeweiligen Randparameters gehören. Es wird also zwischen zwei, zu jeweils einem festen Wert eines Randparameters gehörigen, durch die Interpolator INT1 interpolierten Kennlinien eine weitere Kennlinie durch den Interpolator INT2 interpoliert, die zum aktuellen Wert eines Randparameters 15 gehört. Einen geeigneten analytischen Ansatz zur Gewinnung einer derartigen interpolierten Kennlinie für einen aktuellen Wert 15 eines Randparameters liefert beispielsweise folgender mathematischer Ansatz: Die zu interpolierende Kennlinie heiße  $c(p)$ , die zu dem ersten festen Wert eines Randparameters gehörige Kennlinie heiße  $c_1(p)$  und die zu dem zweiten festen Wert eines Randparameters gehörige Kennlinie heiße  $c_2(p)$ ; der erste feste Wert eines Randparameters sei dabei kleiner als der aktuelle Wert eines Randparameters, zu dem die Kennlinie ermittelt werden soll, und der zweite feste Wert eines Randparameters soll größer sein als der aktuelle Wert eines Randparameters, zu dem die interpolierte Kennlinie ermittelt werden soll. Die Bildungsvorschrift lautet dann:

$$c(p) = a_1 \cdot c_1(b_1 \cdot p) + a_2 \cdot c_2(b_2 \cdot p)$$

Es werden also die beiden der zu interpolierenden Kennlinie benachbarten Kennlinien, die zu festen Werten eines Randparameters gehören, überlagert. Die Kurvenform der zu interpolierenden Kennlinie  $c(p)$  soll der Kurvenform von  $c_1(p)$  um so ähnlicher sein, je näher der zur zu interpolierenden Kennlinie gehörige aktuelle Wert eines Randparameters an dem ersten festen Wert des entsprechenden Randparameters liegt; Entsprechendes gilt für  $c_2(p)$ . Die Koeffizienten  $a_1$  und  $a_2$  sind entsprechend zu wählen:

Der Koeffizient  $a_2$  bestimmt sich zum Quotienten aus der Differenz zwischen dem aktuellen Wert eines Randparameters und dem ersten festen Wert eines Randparameters und der Differenz zwischen dem zweiten festen Wert eines Randparameters und dem ersten festen Wert eines Randparameters; der Koeffizient  $a_1$  wird dann folgendermaßen gewählt:

$$a_1 = 1 - a_2$$

Die Koeffizienten  $b_1$  und  $b_2$  werden vorteilhaft folgendermaßen berechnet: Der Koeffizient  $b_1$  bestimmt sich zum Quotienten aus dem ersten festen Wert eines Randparameters und dem aktuellen Wert eines Randparameters und der zweite Koeffizient  $b_2$  bestimmt sich zum Quotienten aus dem zweiten festen Wert eines Randparameters und dem aktuellen Wert eines Randparameters.

Ein Test des Interpolators INT2, der beispielhaft wie vorher beschrieben arbeiten soll, zeigt, dass dieser Kennlinien, die zu einem festen Wert eines Randparameters gehören, korrekt auf diese selbst abbildet, wenn der aktuelle Wert eines Randparameters mit einem festen Wert eines Randparameters übereinstimmt.

Der Ausgang des Interpolators INT2, der eine interpolierte Kennlinie für einen aktuellen Wert 15 eines Randparameters bereitstellt, wird parallel zu zwei Verarbeitungsstufen VS1 bzw. VS2 geführt. Die Verarbeitungsstufe VS1 be-

rechnet daraus den aktuellen Wert 40 der für die Optimierung ausgewählten Betriebsgröße. Die Verarbeitungsstufe VS2 berechnet den aktuellen Wert 42 des Gradienten der für die Optimierung ausgewählten Betriebsgröße; dazu werden beide Verarbeitungsstufen VS1 und VS2 mit den aktuellen Werten 4a der Anlagenparameter versorgt. Der aktuelle Wert 40 der für die Optimierung ausgewählten Betriebsgröße wird an eine Anzeigeeinheit BI, beispielsweise ein Ausgabefeld eines Computerbildschirms übergeben, wo dann das Verhalten der zu optimierenden Betriebsgröße während des Betriebs der technischen Anlage 1 überwacht werden kann. Der aktuelle Wert 40 der für die Optimierung ausgewählten Betriebsgröße bzw. der aktuelle Wert 42 des Gradienten der für die Optimierung ausgewählten Betriebsgröße werden einer Optimierungsstufe OPT zur Verfügung gestellt.

Die Optimierungsstufe OPT arbeitet einen Optimierungsalgorithmus ab, der vorteilhaft ein Verfahren der sogenannten Sequentiellen Quadratischen Programmierung – abgekürzt SQP – ist. SQP-Verfahren gelten gegenwärtig als die effektivsten für die Lösung allgemeiner Aufgabenstellungen der nicht linearen Optimierung. Einzelheiten zu einem derartigen Verfahren der Sequentiellen Quadratischen Programmierung können z. B. Markos Papageorgiou: "Optimierung: Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung", Oldenbourg, München, Wien, 1996 entnommen werden.

Die Optimierungsstufe OPT erhält außerdem die bei der Optimierung zu beachtenden Nebenbedingungen 8, sowie Startwerte 45 für die Anlagenparameter, mit denen das Optimierungsverfahren initialisiert wird.

Die Güte des durch die Optimierungsstufe OPT ermittelten Optimums für die optimierten Anlagenparameter 4b hängt unter Umständen von der Wahl der Startwerte 45 ab. Vorteilhaft wird das Optimierungsverfahren, das in der Optimierungsstufe OPT implementiert ist, mehrmals gestartet, wobei bei jedem dieser Durchläufe des Optimierungsverfahrens andere Startwerte 45 verwendet werden. Die zum besten Optimierungsergebnis gehörigen optimierten Anlagenparameter 4b werden dann an die technische Anlage 1 übergeben; die Anlagenctile 3, 5, 7, . . . n sind mittels dieser optimierten Anlagenparameter 4b einzustellen.

Die in Fig. 3 dargestellte technische Anlage 1 und die Recheneinheit 20' können in besonders vorteilhafter Weise als Vorrichtung zur Optimierung des Gesamtwirkungsgrades eines Wasserkraftwerks verwendet werden, das mehrere Maschinensätze enthält. Von diesem Kraftwerk kann beispielsweise gefordert werden, dass es eine bestimmte elektrische Gesamtleistung für ein Verbundnetz zur Verfügung stellt, dass jeder Maschinensatz dabei nur in einem bestimmten zulässigen Betriebsbereich arbeitet und dass der Gesamtwirkungsgrad des Wasserkraftwerks dabei optimal ist. In diesem Fall ist die zu optimierende Betriebsgröße des Wasserkraftwerks der Gesamtwirkungsgrad. Die Nebenbedingungen bestehen aus der Bedingung für die abzugebende elektrische Gesamtleistung und den Bedingungen für die Betriebsbereiche, in denen die einzelnen Maschinensätze arbeiten sollen. Besteht der zulässige Betriebsbereich mindestens eines Maschinensatzes aus mehreren sich nicht überlappenden Teilbereichen und/oder Betriebspunkten, so kann dieser bei Verwendung z. B. eines SQP-Verfahrens nicht als Nebenbedingung in die Form genau einer Gleichung und/oder Ungleichung gebracht werden.

In diesem Fall kann die Lösung des Problems darin bestehen, das Optimierungsverfahren mehrmals zu durchlaufen, wobei bei diesen Durchläufen nacheinander je einer der zulässigen Teilbereiche bzw. Betriebspunkte als genau eine Nebenbedingung formuliert wird; das im Vergleich beste

Optimierungsergebnis liefert die optimierten Anlagenparameter (hier: einzustellende Leistungssollwerte für die Maschinensätze). Dieses kombinatorische Verfahren bringt u. U. einen erhöhten Rechenzeitbedarf mit sich; ein Ansatzpunkt zur Verbesserung der Behandlung des Problems von Nebenbedingungen, die aus mehreren zulässigen Teilbereichen und/oder Punkten zusammengesetzt sind und somit in vielen bekannten Optimierungsverfahren nicht direkt verarbeitet werden können, besteht in der Verwendung von Strategien sogenannter genetischer Algorithmen, die in der Literatur bekannt sind.

Ein wesentlicher Randparameter eines Wasserkraftwerks ist die aktuell zur Verfügung stehende nutzbare Fallhöhe des Wassers. In der Regel steht für jeden Maschinensatz ein Kennlinienfeld zur Verfügung, wobei in diesem Kennlinienfeld jeder Kennlinie ein fester Wert der Fallhöhe des Wassers zugeordnet ist. Jede dieser Kennlinie beschreibt den Verlauf des Wirkungsgrades des jeweiligen Maschinensatzes über der von diesem Maschinensatz abgegebenen elektrischen Leistung. Der erste Interpolator interpoliert über diese Leistungen, der zweite Interpolator ermittelt zum aktuellen Wert der Fallhöhe des Wassers die interpolierten Kennlinien der Maschinensätze. Die erste Verarbeitungsstufe bildet den aktuellen Wert des Gesamtwirkungsgrades des Wasserkraftwerks und bringt diesen Wert zur Anzeige; die zweite Verarbeitungsstufe berechnet den aktuellen Wert des Gradienten des Gesamtwirkungsgrades. Beide Verarbeitungsstufen verwenden dazu die aktuellen Werte der an den Maschinensätzen eingestellten Leistungen. Die Optimierungsstufe optimiert den aktuellen Wert des Gesamtwirkungsgrades und berechnet optimierte Leistungswerte für die Maschinensätze, mit denen diese dann zur Erreichung eines optimalen Gesamtwirkungsgrades einzustellen sind. Auf diese Weise wird in der Anlage selbsttätig eine Betriebsgröße (hier: der Gesamtwirkungsgrad) optimal an die nicht beeinflussbaren Randparameter und Nebenbedingungen angepasst.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum optimierten Betrieb einer Anlagenteile (3, 5, 7, . . . , n) mit mehreren einstellbaren Anlagenparametern (4b) enthaltenden technischen Anlage (1), wobei der Betrieb der Anlage von mehreren durch Anlagenparameter (4b) beeinflussbaren Betriebsgrößen (13) abhängig ist, mit folgenden Schritten:
  - a) Mindestens eine der Betriebsgrößen (13) der technischen Anlage (1) wird für die Optimierung ausgewählt;
  - b) eine mathematische und/oder messtechnisch gestützte Beschreibung (22) der Abhängigkeit der zu optimierenden Betriebsgröße (13) der technischen Anlage (1) von den einstellbaren Anlagenparametern (4b) und sich zwangsläufig aus dem Betrieb ergebenden Randparametern (15) wird erstellt;
  - c) die aktuellen Anlagenparameter (4a) und die aktuellen Randparameter (15) werden erfasst;
  - d) Nebenbedingungen (8) für die einstellbaren Anlagenparameter (4b) werden festgelegt;
  - e) für den aktuellen, durch die aktuellen Anlagenparameter (4a) und Randparameter (15) erfassten Betriebszustand werden unter Einhaltung der Nebenbedingungen (8) die Anlagenparameter (4a) optimiert; und
  - f) die Anlagenteile (3, 5, 7, . . . , n) werden mittels der optimierten Anlagenparameter (4b) eingesetzt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Abhängigkeit der zu optimierenden Betriebsgröße (13) der technischen Anlage (1) von den einstellbaren Anlagenparametern (4b) und Randparametern (15) durch tabellenartig dargestellte diskrete Werte (23) beschrieben wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass durch Interpolation ein aktueller Wert (13) der mindestens einen Betriebsgröße (13) aus den einen aktuellen Betriebszustand beschreibenden diskreten Werten berechnet, dieser aktuelle Wert (13) der mindestens einen Betriebsgröße (13) optimiert und daraus die optimierten Anlagenparameter (4b) ermittelt werden.

4. Vorrichtung zum optimierten Betrieb einer Anlagenteile (3, 5, 7, . . . , n) mit mehreren einstellbaren Anlagenparametern (4b) enthaltenden technischen Anlage (1), deren Betrieb von mehreren durch Anlagenparameter (4b) beeinflussbaren Betriebsgrößen (13) abhängig ist, wobei

- a) in der Recheneinheit (20) mindestens eine der Betriebsgrößen (13) der technischen Anlage (1) für die Optimierung festgelegt ist
- b) in der Recheneinheit (20) eine mathematische und/oder messtechnisch gestützte Beschreibung (22) der Abhängigkeit der zu optimierenden Betriebsgröße (13) der technischen Anlage (1) von den einstellbaren Anlagenparametern (4b) und sich zwangsläufig aus dem Betrieb ergebenden Randparametern (15) enthalten ist;
- c) in der Recheneinheit (20) die aktuellen Anlagenparameter (4a) und die aktuellen Randparameter (15) erfasst sind;
- d) in der Recheneinheit (20) die Nebenbedingungen (8) für die einstellbaren Anlagenparameter erfasst sind;
- e) die in einer in der Recheneinheit (20) enthaltene Optimierungsstufe (24) ertüchtigt ist, die Randparameter (4a) für den aktuellen, durch die aktuellen Anlagenparameter (4a) und Randparameter (15) erfassten Betriebszustand unter Einhaltung der Nebenbedingungen (8) zu optimieren; und
- f) die Anlagenteile (3, 5, 7, . . . , n) mittels der optimierten Anlagenparameter (4b) einstellbar sind.

5. Computerprogrammprodukt, das direkt in den internen Speicher eines digitalen Computers geladen werden kann und Softwarecodeabschnitte umfasst, mit denen die Schritte gemäß Anspruch 1 ausgeführt werden, wenn das Produkt auf einem Computer läuft.

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

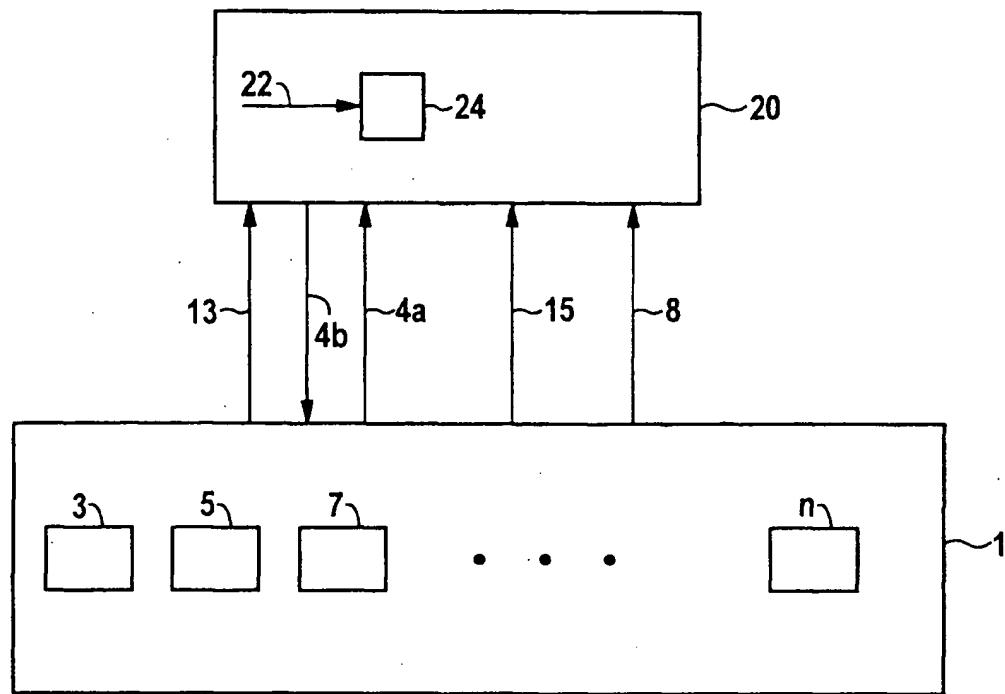


FIG 1

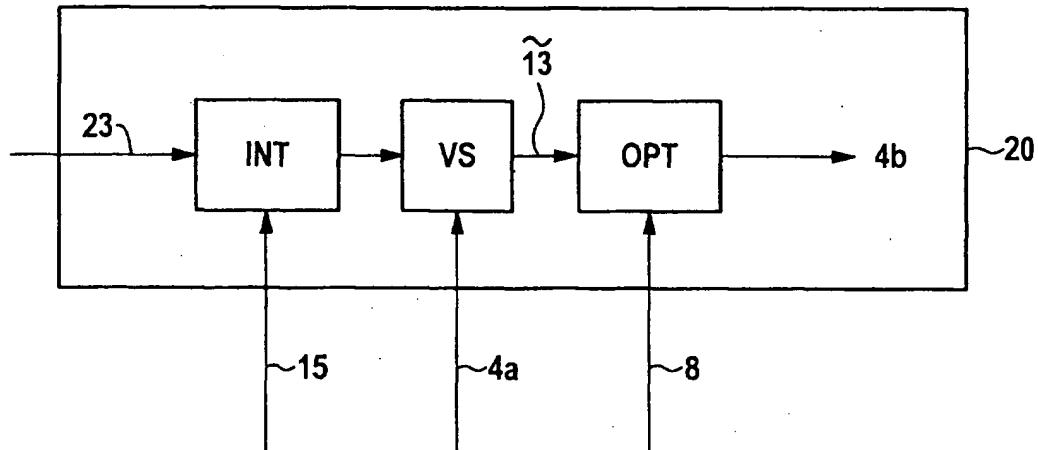


FIG 2

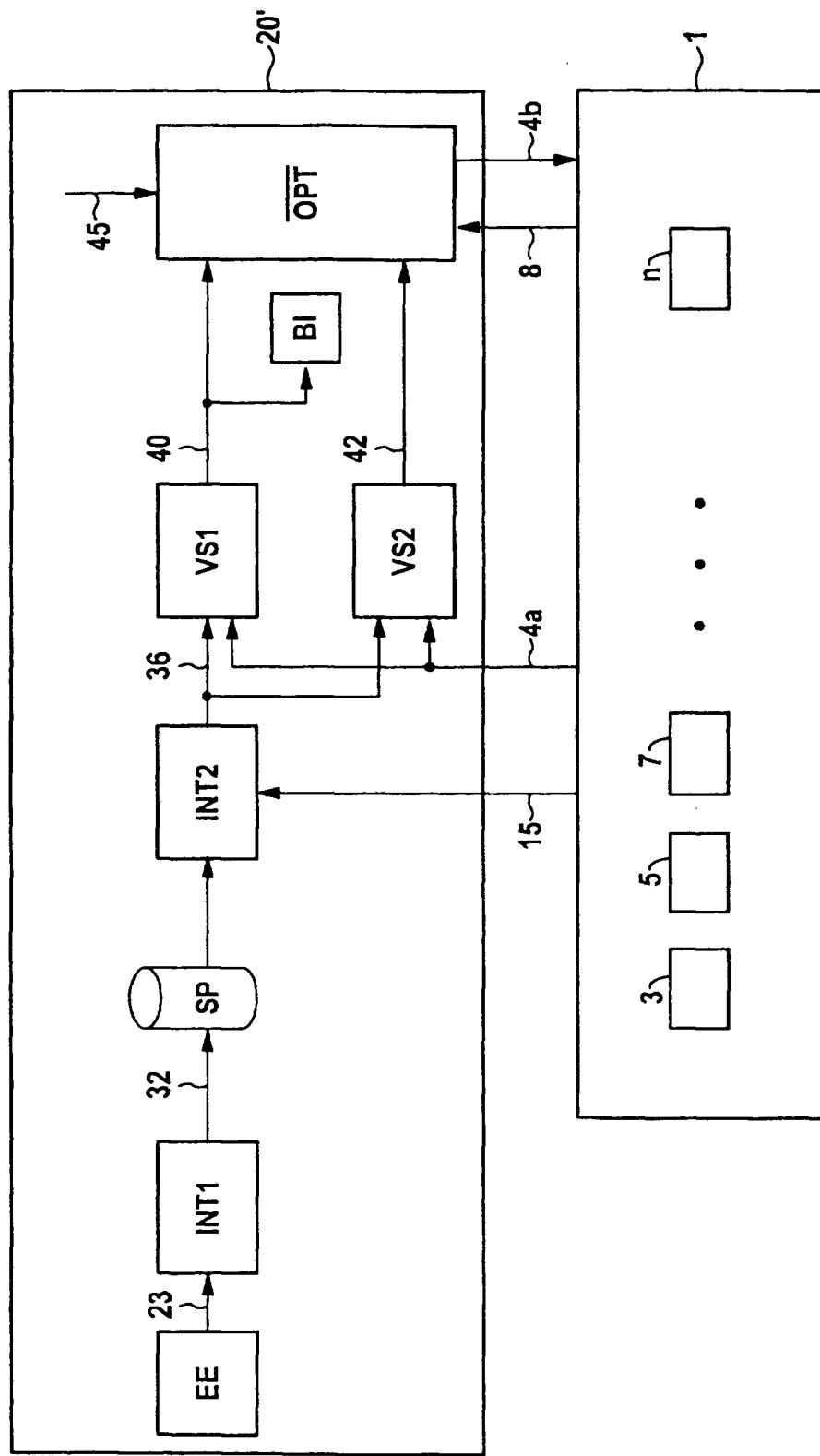


FIG 3